

UTILIZACIÓN DE LA LAMBERTIANIDAD DE LA SUPERFICIE EN EL CONTROL DE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN IMÁGENES LANDSAT-TM

C. PINILLA (*), F. J. ARIZA (*), S. GARCIA-LÓPEZ (***) y M. SÁNCHEZ

cpinilla@ujaen.es

*Grupo de Investigación en Ingeniería Cartográfica. Virgen de la Cabeza. 2 23071 - Jaén
Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Virgen de la Cabeza- 2, 23071 - Jaén.
Dpto. Ing. Gráfica e Ing. y Sistemas de Inf. Cartográfica. Avda. Menéndez Pidal s/n. 14080 Córdoba.*

RESUMEN: La corrección radiométrica de imágenes de satélite por eliminación del factor topográfico requiere el conocimiento del carácter lambertiano de la superficie, materializado en el exponente k de la ecuación de Minnaert. El comportamiento espectral de k puede ser útil para elegir la mejor corrección atmosférica de la imagen, si bien su establecimiento presenta dificultades especialmente notorias cuando se aplica sobre regiones de topografía accidentada. Cuando la ocupación de suelo lo permite es preferible calcular un exponente para cada cultivo predominante.

ABSTRACT: Radiometric correction of satellite images by topographic factor removing requires the knowledge of the surface's lambertian behavior which is expressed through the k -exponent of the Minnaert's equation. The spectral behavior of k could be used to choose the better radiometric correction of the image. Nevertheless, its quantification presents difficulties especially when the correction is applied to regions with a strong topography. If possible, it is preferable to derive a specific exponent of the predominant crops in the scene.

Palabras clave: corrección radiométrica, factor topográfico, lambertiano, Minnaert.

INTRODUCCIÓN

Las medidas de radiancia de la superficie efectuadas por el sensor están influidas por ciertos factores entre los que se encuentran la situación de la fuente de iluminación, que en el caso de la teledetección óptica convencional, está caracterizada por el acimut y elevación solar en el instante de la adquisición de la imagen, la exposición de la superficie a la fuente de iluminación, materializada por sus valores de pendiente y orientación y el tipo de reflectancia de la superficie, distinguiéndose entre lambertiana, especular y el modelo de Minnaert, intermedio a los anteriores (Felicísimo, 1994). La normalización topográfica clásica establece el valor teórico del Nivel Digital para cada celda a partir de los valores observados:

$$ND_{normal}(\lambda) = ND_{observado}(\lambda) / \cos i$$

donde i es el ángulo de incidencia de la luz solar sobre cada celda de terreno. El valor de $\cos i$ es:

$$\cos i = \sin \alpha \cos \xi \cos(\varphi - \kappa) + \cos \alpha \sin \xi$$

donde α y κ son, respectivamente la inclinación y orientación del terreno en el punto considerado y φ y ξ el acimut y la elevación solar respectivamente. Esta corrección solamente modela la radiación directa, por lo que las zonas débilmente iluminadas (con un valor de $\cos i$ próximo a 0), que reciben sin embargo una cierta proporción de radiación difusa, resultan desproporcionadamente brillantes al aplicarles este tipo de normalización. Si la superficie observada es parcialmente lambertiana, la reflectancia medida por el sensor deberá depender de la orientación relativa del terreno no sólo con respecto al sol sino también con respecto a la posición del propio satélite. Para la normalización topográfica es necesario generar un modelo superficial de radiancia que además del ángulo de incidencia i , tenga también en consideración el formado por la visual instantánea con la normal al terreno (ángulo e), siendo:

$$\cos e = \sin \alpha \sin \theta \cos(\kappa - \sigma) + \cos \alpha \cos \theta$$

donde θ es el ángulo de visión instantánea del sensor y σ la inclinación de la órbita del satélite. La expresión de

la superficie de Minnaert para una fuente de luz direccional es (Woodham y Lee, 1985):

$$L_r = \frac{E_0(k+1)}{2\pi} \frac{(\cos i \cos e)^k}{\cos e}$$

donde L_r es la radiancia puntual de la superficie de Minnaert y k es un parámetro que caracteriza la lambertianidad de la superficie, siendo 0 para superficies especulares, y 1 para las absolutamente difusas o lambertianas.

Dado que para cualquier tipo de superficie, el término $E_0(k+1)/2\pi$ es constante, considerando además los parámetros de calibración del sensor TM, puede establecerse una relación directa entre radiancia y nivel digital para cada banda de la imagen Landsat TM, lo que permite establecer para el modelo de Minnaert una ecuación de normalización topográfica modelo de Minnaert: una ecuación de normalización topográfica (García *et al.*, 1996):

$$ND_{normal}(\lambda) = ND_{observado}(\lambda) \frac{\cos e}{\cos^{k(\lambda)} i \cos^{k(\lambda)} e} = ND_{observado}(\lambda) \cos^{-k(\lambda)} i \cos^{1-k(\lambda)} e$$

El cálculo de $k(\lambda)$ se hace determinando la pendiente de la recta de regresión para cada banda entre $\ln[ND_{observado}(\lambda) \cos e]$ y $\ln[\cos i \cos e]$.

Este modelo presenta la ventaja de que, en áreas débilmente iluminadas, k previene una división por valores pequeños, de tal forma que impide una saturación en la corrección, como ocurría con el modelo lambertiano.

El objetivo de este trabajo es, por un lado, evaluar la posibilidad de utilizar el valor espectral del exponente de lambertianidad k para determinar la mejor corrección atmosférica de la imagen multispectral y, por otro, poner de manifiesto la dificultad de elegir adecuadamente el valor de k cuando la topografía del terreno es accidentada.

INFORMACIÓN Y MÉTODOS

El área de trabajo está centrada en el Término Municipal de Albanchez de Úbeda, en la provincia de Jaén. Se trata de una zona abrupta enclavada en la comarca de Sierra Mágina que presenta en su parte norte una zona de topografía más suave en la que predomina el olivar. Se trabajó con una imagen Landsat-TM de julio de 1995 sometida a un proceso de corrección atmosférica, siguiendo la metodología de Kauffman (1989).

Para determinar el valor del exponente k se estableció la regresión a partir de diagramas de dispersión de un subconjunto de 2071 celdas aleatoriamente distri-

buidas por la escena y cuyos resultados se recogen en la Tabla 1. En ella puede observarse un carácter parcialmente lambertiano de las cubiertas de la escena para todas las bandas TM, a excepción de la TM6, que muestra un mayor comportamiento especular.

Banda	Recta	r	k
TM1	y=0,5022x+4,0323	0,7087	0,5022
TM2	y=0,4846x+3,7879	0,6354	0,4846
TM3	y=0,4928x+4,1518	0,6214	0,4928
TM4	y=0,5201x+4,4806	0,7740	0,5201
TM5	y=0,5243x+4,8982	0,6432	0,5243
TM6	y=0,2997x+5,1024	0,7669	0,2997
TM7	y=0,5376x+4,1787	0,5815	0,5376

Tabla 1. Regresión entre $y = \ln[ND_{observado}(\lambda) \cos e]$ y $x = \ln[\cos i \cos e]$ (var. independiente) a partir de la imagen corregida del efecto atmosférico.

RESULTADOS

Se estudió el comportamiento de k en función de la longitud de onda. La figura 1 muestra dicha dependencia y en ella puede observarse cómo crece k desde el visible hasta el IR medio. A partir de ese punto, aunque no se recoge en la gráfica decrece hasta el infrarrojo térmico. Una interpretación posible es considerar que el comportamiento de las cubiertas de la escena estudiada se va haciendo más lambertiano desde el visible hasta presentar un máximo en torno a los 2,2 μm . Destaca la anomalía en el comportamiento de k en el intervalo comprendido entre 0,4 y 0,5 μm (azul y verde espectral, respectivamente) con respecto a la tendencia natural de la curva, que conllevaría un cambio en el comportamiento lambertiano de la superficie en ese intervalo espectral, lo cual no es coherente. Esta anomalía de k más bien sugiere que la corrección atmosférica efectuada sustrayendo de los ND original es los valores proporcionados por el método de Kauffman es inadecuada en este caso, porque sobrevalora el efecto a corregir.

Para comprobarlo se aplicó una corrección sustrayendo solamente dos tercios de los valores anteriores y se realizó la regresión para deducir nuevamente los exponentes k (Tabla 2). Los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 2, que presentan un comportamiento más natural. En consecuencia, puede proponerse éste como un procedimiento alternativo a los usuales a fin de establecer la corrección atmosférica más adecuada para cada imagen Landsat TM o incluso para las de otros sensores, en virtud del comportamiento reflectivo de la escena en el visible y el IR próximo.

En general, adoptar este tipo de corrección radiométrica en escenas como la estudiada adolece de dos

defectos. Por un lado, los coeficientes de correlación obtenidos en el cálculo de la pendiente de la recta de regresión que proporciona el valor del exponente k con el cual se calcula el factor topográfico $\tau(\lambda)$ son bastante bajos, es decir, la dependencia de las variables puestas en juego para buscar k es muy débil, y por otro, en zonas como ésta con relieve muy acusado, obtener los exponentes k por regresión introduce una cierta aleatoriedad. A esta conclusión se llega tras estudiar el comportamiento de cose frente a cosi.

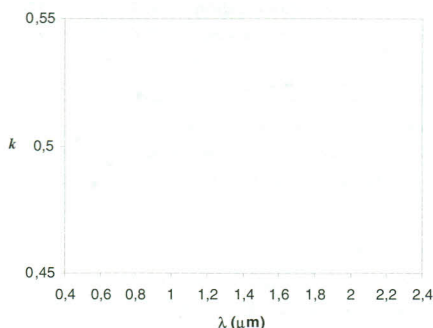


Figura 1. Comportamiento del exponente k en la escena completa frente a la longitud de onda.

Banda	Recta	r	k
TM1	$y = 0.3658 x + 4.5915$	0,6761	0,3658
TM2	$y = 0.4213 x + 4.0112$	0,6680	0,4213
TM3	$y = 0.4928 x + 4,1518$	0,6214	0,4928
TM4	$y = 0,5201 x + 4,4806$	0,7740	0,5201
TM5	$y = 0,5243 x + 4,8982$	0,6432	0,5243
TM6	$y = 0,2997 x + 5,1024$	0,7669	0,2997
TM7	$y = 0,5376 x + 4,1787$	0,5815	0,5376

Tabla 2. Regresión entre $\ln[ND_{\text{observado}} \lambda \cos e]$ (var. dependiente) y $\ln(\cos i \cos e)$ (var. independiente) a partir de las bandas con corrección atmosférica atenuada.

Si bien sobre superficies de topografía suavemente ondulada, el valor de $\ln(ND_{\text{observado}} \cos e)$ para todas las bandas exceptuado el IR térmico presenta una determinada correlación con $\ln(\cos i \cos e)$ (Figura 3), en áreas más abruptas en las que coexisten laderas de gran pendiente fuertemente iluminadas y más expuestas al sensor y laderas débilmente iluminadas y menos visibles desde el sensor, la nube de puntos del diagrama de dispersión se fractura en subconjuntos pertenecientes ambos tipos de laderas. Ajustar una recta de regresión en esas circunstancias para calcular k es inconsistente e induce a erro-

res en la interpretación de los resultados. Por el contrario, la forma del diagrama sugiere más bien ajustar dos rectas de regresión diferentes y, en consecuencia, obtener dos exponentes k distintos, lo cual podría interpretarse como la existencia de dos comportamientos diferentes de las cubiertas según sean los ángulos de observación e iluminación (Figura 4). En general, la pendiente de la recta de mejor ajuste es mayor para las laderas bien iluminadas y más visibles, lo que desde el punto de vista de la reflexión se traduce en un comportamiento más lambertiano. De otra parte, el carácter lambertiano no varía sin embargo con la orientación de la ladera si la observación se realiza en el IR próximo, como lo demuestra la alineación (con la misma pendiente) de las dos nubes de puntos pertenecientes a laderas sombreadas e iluminadas respectivamente, según se muestra en la Figura 5.

Dado que es un cultivo muy presente en la zona, se han aislado parcelas de olivar con el objeto de obtener un valor del exponente k que caracterice el carácter lambertiano de este cultivo con más precisión. Repetido el procedimiento expresado más arriba con las bandas originales con corrección atmosférica atenuada pero enmascarando la escena con las zonas de olivar, se obtuvieron, aunque con una menor correlación, los coeficientes mostrados en la Tabla 3, que ofrecen gráficamente el comportamiento recogido en la Figura 6.

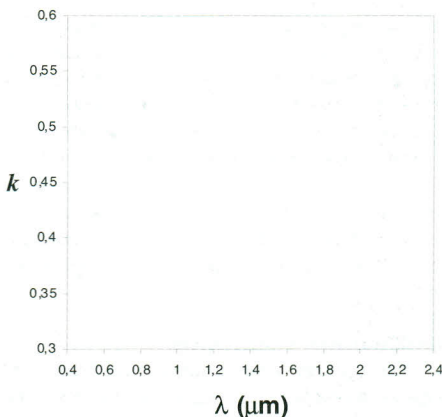


Figura 2. Comportamiento del exponente k en la escena completa frente a la longitud de onda con corrección atmosférica atenuada.

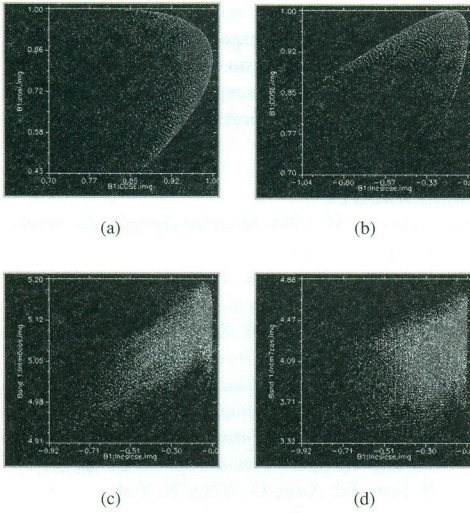


Figura 3. Comportamiento en un área con topografía suave de: (a) $\cos i$ frente a $\cos e$; (b) $\cos i$ frente a $\ln(\cos i \cos e)$; Comportamiento de $\ln(ND \cos e)$ frente a $\ln(\cos i \cos e)$ para: (c) TM6; (d) TM7.
(Ver figura en color en la página 680)

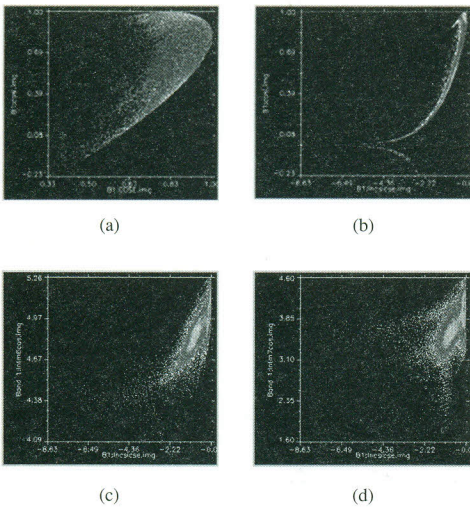


Figura 4. Comportamiento en un área con topografía accidentada de: (a) $\cos i$ frente a $\cos e$; (b) $\cos i$ frente a $\ln(\cos i \cos e)$; Comportamiento de $\ln(ND \cos e)$ frente a $\ln(\cos i \cos e)$ para: (c) la banda TM6; (d) la banda TM7.
(Ver figura en color en la página 680)

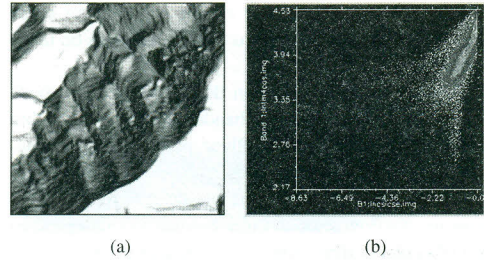


Figura 5. Invariancia de la lambertianidad de las cubiertas pertenecientes a laderas opuestas.
(a) Subescena estudiada. (b) Las dos clústeres correspondientes a ambas laderas.
(Ver figura en color en la página 680)

Banda	k
TM1	0,2456
TM2	0,3162
TM3	0,3844
TM4	0,5833
TM5	0,4789
TM6	0,1861
TM7	0,4449

Tabla 3. Valores del exponente k para el olivar.

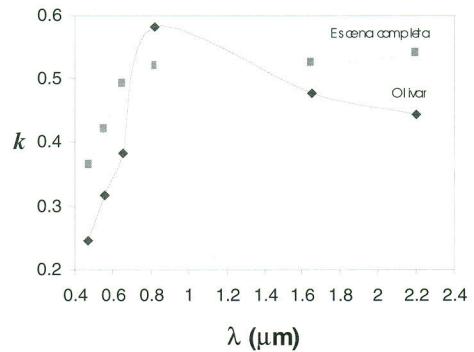


Figura 6. Comportamiento espectral del exponente k para olivar y para la escena completa.

Comparando los valores de k de la escena completa y de la superficie ocupada exclusivamente por olivar, puede deducirse el comportamiento más espectral de este cultivo con respecto a un suelo ocupado por cubiertas heterogéneas, si se exceptúa el IR próximo. En esta región espectral, por- el contrario, el olivar se comporta

más lambertianamente y se acetúa este carácter sobre las demás bandas y sobre las demás cubiertas de la escena.

Una posible explicación de este fenómeno puede ser que la reflectancia de la banda TM4 prevalece sobre las demás en las zonas de olivar, para la cobertura media habitual en la zona de estudio. Y precisamente la presencia del olivar responsable de esta reflectividad con una configuración de cultivo esparcido, independiza la reflectancia direccional de la dirección de observación. Por esta razón, es posible que la influencia más apreciable sobre la reflectancia en el IR próximo sea la atribuible a la fracción de suelo desnudo descubierto más incluso que la propia orientación relativa de la ladera.

CONCLUSIONES

La deducción del exponente k de la ecuación de normalización de Minnaert como caracterizador de la lambertinidad de la escena es poco fiable en zonas de topografía abrupta.

El estudio del comportamiento del exponente k frente a la longitud de onda puede servir como criterio para establecer los mejores valores para la corrección atmosférica.

En cuanto a su hábito reflectivo, el olivar muestra un comportamiento más especular en todas las bandas en comparación con el resto de cubiertas heterogéneas de la escena estudiada, excepto en el infrarrojo próximo, en la cual su comportamiento es más lambertiano.

BIBLIOGRAFÍA

- FELICISIMO, A. M. 1994. *Modelos digitales del terreno*, Pentalfa. Oviedo.
- WOODHAM R.-J. , LEE, T. K. 1985. *Plastometric method for radiometric correction of multispectral scanner data*. Canadian J. of R. Sens. 11 (2):132161.
- GARCÍA, E. *et al.*, 1996. *Corrección del efecto topográfico en imágenes Landsat-TM*. Cuadernos del Centro de Estudios. Ambientales C.E.A. Vitoria-Gasteiz.
- KAUFMAN Y. J. 1989. *The atmospheric effect on remote sensing and its correction*. Theory and Appl of Opt. R. Sens. Ed. Asrar, G. Wiley. N. York.